

中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制

曹光秀^{1,2}, 王克勤^{1,2}, 赵洋毅^{1,2}, 段旭^{1,2}

(1. 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224; 2. 国家林业局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224)

摘要: 为探究中亚热带地区常绿阔叶林地的地表径流和侵蚀产沙的影响机制, 于 2016 年和 2017 年的 5—9 月在天然降雨条件下, 采用野外定位观测结合室内试验分析方法, 得到磨盘山常绿阔叶林林外降雨和林内穿透雨及其雨滴特性数据, 采用 RDA 排序及 CANOCO 的 Forward 分析筛选出主导环境影响因子。结果表明: (1) 产沙量与林外降雨量和林内穿透雨量存在正相关关系。当径流量 > 0.064 mm 时, 研究区内形成的地表径流才开始携带泥沙; 林冠层对降雨动能的缓冲作用在降雨强度小的情况下较明显。(2) 林冠缓冲动能、叶面积指数和树干茎流量与径流量产沙量存在负相关关系, 降雨历时、林外降雨量、林内降雨量、平均雨强、雨滴个数、雨滴直径、雨滴速度、林内降雨动能、降雨总动能对径流量产沙量产生正相关影响。(3) 对 12 个环境因子进行主导因子筛选, 降雨总动能、林外降雨量、平均雨强、林冠缓冲动能、降雨历时对径流量产沙量的影响效果较为显著。从典范特征值分析结果显示, 仅选择这 5 个主环境影响变量可解释环境影响因子与径流量产沙关系 73.2% 的信息量, 比 12 个变量所解释的信息量仅少 16.8%。

关键词: 径流量; 产沙量; 冗余分析; 影响因子; 常绿阔叶林

中图分类号: S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0030-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.006

The Mechanism of Surface Runoff and Sediment Yield of Evergreen Broad-leaved Forest in the Middle Subtropical Region

CAO Guangxiu^{1,2}, WANG Keqin^{1,2}, ZHAO Yangyi^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}

(1. Southwest Forestry University College of Ecology and Soil & Water Conservation, Kunming 650224;

2. Yuxi Forest Ecosystem Research Station, China's State Forestry Administration, Kunming 650224)

Abstract: To explore the mechanism of surface runoff and sediment yield of evergreen broad-leaved forest in the middle subtropical region, the natural rainfall and raindrop characteristics from May to September in 2016 and 2017 were observed by field observation and indoor test analysis. Also, the leading environmental factors were selected by RDA sequencing and the Forward analysis of CANOCO. The results showed that: (1) Sediment yield was positively correlated with rainfall outside forest and throughfall in forest area. When runoff was greater than 0.064 mm in the study area, sediment occurred. The buffer effect of canopy layer on rainfall kinetic energy was more obvious when rainfall intensity was small. (2) Canopy buffering energy, leaf area index and stemflow and sediment yield had a negative correlation, rainfall duration, rainfall outside the forest, forest rainfall, average rainfall intensity, raindrop number, raindrop diameter, raindrop velocity, rainfall kinetic energy and rainfall kinetic energy on runoff sediment produced positive influence. (3) Through the screening of the leading factors of 12 environmental factors, we got the most significant influences of total rainfall, total rainfall, average rainfall intensity, canopy buffer kinetic energy and rainfall duration on the runoff and sediment yield of 12 environmental factors. The results from canonical eigenvalues analysis showed that choosing only 5 main environmental variables could explain 73.2% of the information content of the relationship between environmental factors and runoff and sediment yield, which was only 16.8% less than that explained by 12 variables.

Keywords: surface runoff; sediment yield; redundancy analysis; influence factor; evergreen broad-leaved forest

收稿日期: 2018-01-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560233, 31760149); 云南省教育厅重点项目(2015Z141); 国家林业局林业科技创新平台运行项目(2018-LYPT-DW-162)

第一作者: 曹光秀(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 2207043897@qq.com

通信作者: 赵洋毅(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持和生态恢复研究。E-mail: yzy2301@foxmail.com

降雨侵蚀土壤表层的动力主要来自于雨滴动能,表层土对雨滴的动能具有缓冲作用。在此过程中,土壤颗粒被分散,最终导致土壤中降雨入渗量下降,地表径流量增加^[1]。地表植被的覆盖主要从两个方面缓解土壤侵蚀:一方面植被地上部分削减雨滴动能;另一方面植被根部改善土壤层的理化性质,缓解降雨及坡面径流对土壤的侵蚀作用^[2],从而综合影响林地的产流产沙机制。诸多研究^[1,3-4]表明,森林植被能增加林下土壤的入渗能力,在水源涵养和水土保持方面起着关键作用。

国内学者主要在雨滴特征、雨滴动能、植被盖度、土壤地形、气候气象条件等多个影响因子对产流产沙、土壤侵蚀进行定量研究,并得出相关模型及方程式^[2,3,5]。其中植被林冠的类型、冠幅、盖度和地势区位直接和间接影响植被区的产流产沙量,是控制水土溅蚀的重要因素^[6]。国外学者 Rey^[7]和 Raya 等^[8]研究表明,不同植被的格局布设及条带类型的林冠对降雨截留及控制水土流失的效果存在明显差异。与此相比,国内针对植被布设格局与水土流失的相关试验研究^[9]较少,并且对于植被与水土流失关系的研究^[10]多集中在不同人工植被配置及不同农作物的种植方式等方面,得出的研究结果多是定性和半定量的分析。目前,很多学者对黄土地区的水文过程进行了深入研究^[11-12],而西南土石山区的红壤结构和物质构成等特点与黄土差异较大,且对坡面水文过程的影响也不尽相同,难以直接参考或引用;此外,森林水文科学的研究具有很强的区域性,当前针对长江中下游地区以及与本研究区域相同纬度的其他区域的水文变化研究^[3,11]较多,而对亚热带高原季风气候区水文过程研究较少。常绿阔叶林是中亚热带地区地带性植被,林地地表具有丰富的凋落物,能有效抑制土壤蒸发,对降雨存储及动能缓冲具有重要作用,特别是原生林对地区的蓄水保土起着不可替代的作用^[12-13]。因此,研究中亚热带常绿阔叶林地表径流及产沙影响机制,能够为区域水土保持林业防护工程建设和高海拔地区的雨季防洪水源存储等提供参考依据,也可为后期研究区构建侵蚀模型提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市新平县磨盘山国家森林公园(23°54′00″—24°02′30″N,101°55′13″—102°04′00″E),南北最长 15.47 km,东西最宽 14.81 km,区域总面积为 7 232.1 hm²。研究区地处北回归线以北,具有典型的亚热带高原季风气候。年均气温 17~20 ℃,最冷月(1月)

平均气温 10~20 ℃,最热月(6月)平均气温 21~28 ℃,极端最低气温-8.6 ℃,磨盘山顶≥10 ℃积温为 4 800 ℃,年均降水量 1 000 mm 以上,5—10 月为雨季,其中 6—8 月雨量集中,11 月至翌年 4 月为旱季。土壤岩基以砂岩类岩石为主,种类较多,有砂岩、砂页岩、紫色砂岩、红色砂岩等,风化较强烈。由于气候条件优越,磨盘山生物种群复杂,物种丰富。据不完全统计,共有种子植物 324 种,分属 98 科 227 属,其中有国家二级保护植物野茶树(*Eurya alata* Kobuski)、楠木(*Phoebe nanmu*)等。研究区常绿阔叶林主要树种有光叶柯(*Lithocarpus mairei*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、牛筋条(*Dichotomanthus tristaniaecarpa*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia*)、木荷(*Schima superba* Gardn)、长叶栎(*Lithocarpus confinis*)和野樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨观测 选取云南省玉溪市森林生态系统国家定位观测的 100 m×100 m 常绿阔叶林固定样地。海拔 2 362 m,坡向为东北向,中坡位,坡度 28°,植被平均胸径 22.05 cm,平均树高 15.25 m,树龄 75 年,郁闭度 0.89,密度 934 株/hm²。

(1)林外大气降雨观测。在距离样地 500 m 的空旷位置已建有全自动气象观测场,场地内布设 Envidata-thies 全自动野外固定气象站,具有实时监测降雨量、风速、风向、辐射、气温、气压、相对湿度等气象数据的功能。并在观测场内设有 2 个 U30 自记雨量计,进行对比参考,以确保研究区大气降雨数据的真实可靠。

(2)林内穿透降雨观测。在 100 m×100 m 大样地内设置 3 个 20 m×20 m 的标准固定样地,每个固定样地内布设 5 个标准雨量筒和 1 个自记雨量计,用于监测林内穿透降雨数据。

1.2.2 树干茎流监测 在选取的样地内对每株乔木进行林分调查,测定其胸径。根据调查结果每隔 5 cm 对林木划分一个径级,每个径级下的乔木各选 3~4 株,一共选取 10 株标准木进行树干茎流的观测。测定各标准木的树冠投影面积,并在距地面 1.3 m 处起,用直径为 2 cm 的聚乙烯塑料管缠绕树干一圈,用玻璃胶固定,在适当的位置打孔,将树干茎流导入塑料管下端连接的 2 L 塑料桶内,塑料桶底部埋于土壤中起固定作用,雨后收集树干茎流,与穿透雨量同时测定。

1.2.3 产流产沙量监测 样地坡下建有标准径流场,宽 5 m,并与该地的等高线平行,水平投影长 20 m,水平投影面积 100 m²。径流场四周有水泥建筑的

矮墙,矮墙下端为集流槽,其宽、深均为 20 cm。集流槽由水泥筑建而成,中间设有圆形过水孔,过水孔上有反滤层遮挡枯枝落叶。降雨发生时,坡面径流通过集流槽流入观测房内的集水池(1 m×1 m×1 m)中,利用 5 m 的塔式水尺进行测定读数。读数后将水池里的径流用木棍搅拌均匀,用泥沙测定仪测定,并用 250 mL 的聚乙烯塑料瓶采集 3 份水样带回实验室,用烘干法测定泥沙含量。最后将 2 个数据进行对比参考,确保数据的准确性。

1.2.4 雨滴大小的测定 本研究采用传统的滤纸色斑法对雨滴直径大小进行测量,具体做法是采用曙红粉和滑石粉按质量比 1:10 的比例均匀混合,用毛刷将其均匀涂抹在杭州特种纸业生产的 15 cm 的定性滤纸上。每次降雨前将涂抹好颜料的滤纸平铺在 20 cm×50 cm 的聚乙烯塑料板上,将塑料板带到常绿阔叶林样地内布有雨量筒的样树下,接收落下来的林内穿透雨雨滴。在每场降雨开始后对林内外降雨进行雨滴取样,待色斑布满滤纸后取下,换上新的刷有涂料的滤纸,最后收集好布有色斑的滤纸,采用游标卡尺进行雨滴直径的测定,并记录数据。

1.2.5 数据处理

(1)树干茎流量计算。将收集的树干茎流量按公式(1)计算,得到研究区样地的树干茎流量。

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot M_i}{S \cdot 10^4} \quad (1)$$

式中: C 为树干茎流量(mm); n 为树干径级数; C_i 为第*i*径级单株树干茎流体积(mL); M_i 为第*i*径级的树木株数; S 为样地面积(m²)。

(2)雨滴终点速度计算。雨滴终点速度的大小显著影响降雨动能,林外雨滴终点速度计算公式为^[13]:

当 $d < 1.9$ mm 时,采用修正的沙玉清公式

$$V_{\text{林外}} = 0.496 \text{antilong} \sqrt{28.362 + 6.524 \lg 0.1d - (\lg 0.1d)^2} - 3.665 \quad (2)$$

当 $d \geq 1.9$ mm 时,采用修正的牛顿公式

$$V_{\text{林外}} = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d} \quad (3)$$

林下雨滴终点速度计算公式

$$V_{\text{林内}} = V_{\text{林外}} [1 - \exp(-2gh/V_{\text{林外}}^2)]^{1/2} \quad (4)$$

式中: d 为雨滴直径(mm); $V_{\text{林内}}$ 为林下降雨不同直径的雨滴到达林地时的速度(m/s); $V_{\text{林外}}$ 为不同直径雨滴降落的终点速度(m/s); g 为重力加速度(m/s²); h 为林下降雨的雨滴降落高度(m)。

(3)降雨动能计算。单个雨滴的动能计算公式为:

$$e = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{12}\rho\pi d^3 v^2 \quad (5)$$

式中: m 为雨滴质量(g); ρ 为水的密度,标准状态下为 1 g/cm³; v 为雨滴终点速度(m/s)。

雨滴总动能:

$$E_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n e_i \quad (6)$$

单位降雨动能:

$$E = E_{\text{总}} / HS \quad (7)$$

式中: i 为雨滴个数; E 为单位面积上单位降雨量的雨滴动能(J/(m²·mm)); H 为降雨深(mm); S 为滤纸面积(m²)。

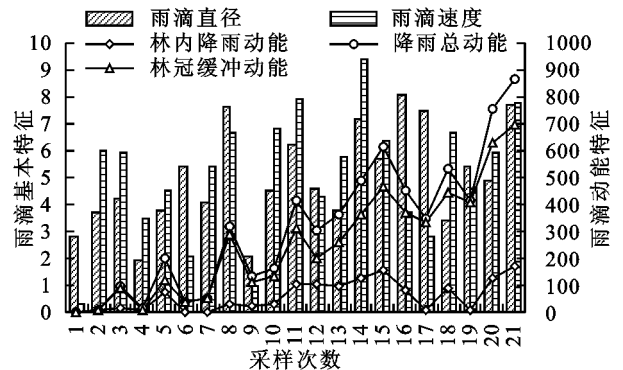
(4)冗余分析。采用 RDA 分析对研究区产流产沙影响因子进行排序,得出地表产流产沙变异的主控影响因素。为避免变量冗余,首先使用前向选择法选定一组代理变量进行分析,同时用 Monte Carlo 检验法检验代理变量与产流产沙值是否存在显著相关性,再用 CANOCO 的 forward 分析筛选出主导环境影响因子,并对其进行 RDA 排序。

2 结果与分析

2.1 径流量产沙量影响因子的基本特征

2.1.1 降雨特性与降雨动能的特征 根据对 2016 年和 2017 年 5—9 月在研究区采集的林内外降雨的雨滴个数和雨滴大小数据,结合公式(2)~公式(7),计算得出雨滴速度、林内降雨动能、降雨总动能和林冠缓冲动能。

从图 1 可以看出,林内外降雨动能总体上随着雨滴直径和雨滴速度的增大而增大,林冠缓冲动能随着林外降雨动能的增大有减缓的趋势;相对来说,在林外降雨动能、雨滴速度、雨滴直径较小的情况下,林冠缓冲动能较大。说明在降雨量小时,林冠对降雨截留的效果较明显,而降雨量较大时,降雨动能对地表泥沙的冲刷力较强,地表径流量较大。

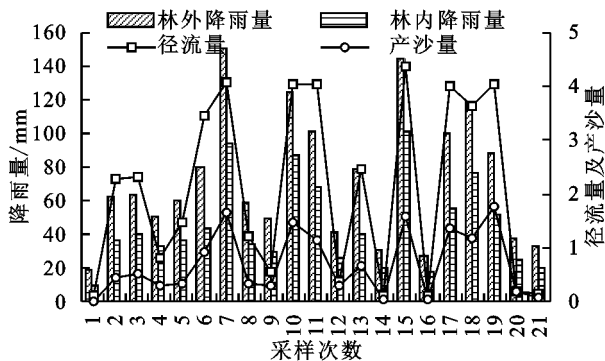


注:雨滴直径单位为 mm;雨滴速度单位为 m/s;林内降雨动能、降雨总动能和林冠缓冲动能的单位为 J/(m²·mm)。

图 1 研究区降雨特性与降雨动能的特征

2.1.2 降雨量与径流量和产沙量的特征 根据研究区降雨情况,对 2016 年和 2017 年样地旁布设的 5 m×20 m 的标准坡面径流小区内的集水槽进行径流量和产

沙量的测定,得出降雨及林地特征和产流产沙量分布状况。从图2可以看出,在21次野外监测中,林内降雨量最大值出现在第15次采样中,为100.8 mm,相应径流量的最大值为4.36 mm。林外降雨量最大值出现在第7次采样中,为151 mm,但其所对应的径流量较第15次采样时小,说明林内降雨量对径流量的影响较林外降雨明显,这可能与降雨历时的长短、雨量大小及研究区的土壤质地和林下枯落物层的厚度有关。从产沙量来看,当林外降雨量>19 mm、林内降雨量>9.8 mm时,林内径流产生少量泥沙,产沙量最大值在第19次采样中。这是因为当短历时、雨强大的降雨事件发生时,降雨对土壤表层的冲刷作用集中,产生的地表径流中携带大量的泥沙。总体来看,林内降雨量随着林外降雨量的增大而增大,径流量和产沙量随着林内外降雨量的增大而增大。



注:径流量单位为 mm;产沙量单位为 t/km^2 。

图2 林内外降雨量与径流量、产沙量的特征

2.2 径流量与产沙量的相关性分析

采用 SPSS 19.0 对林地坡面径流量和产沙量进行变异描述性统计分析(表1),可知产沙量和径流量的变异系数较小,两个指标的平均变化比较稳定,分别为 0.87% 和 0.80%。峰度是描述总体中所有取值分布形态陡缓程度的统计量^[14],从峰度和偏度的值来看,产沙量和径流量的变异度符合正态分布。

表2 影响因子的描述性统计分析

影响因子	极小值	极大值	均值	变异系数	标准差	偏度	峰度
降雨历时	756.00	5343.00	2393.42	0.64	1545.37	0.83	-0.85
林外降雨量	33.04	165.20	77.93	0.46	35.68	1.08	0.73
穿透雨量	18.19	90.20	43.96	0.54	23.74	0.93	-0.46
树干茎流量	0.71	3.00	1.51	0.51	0.77	0.68	-0.78
叶面积指数	2.91	3.67	3.34	0.16	0.19	-0.45	0.11
降雨强度	0.62	4.51	2.40	0.45	1.09	0.37	-0.77
雨滴个数	278.00	1495.00	791.00	0.45	358.62	0.24	-0.87
雨滴直径	0.10	8.60	5.23	0.38	1.98	0.10	-0.91
雨滴速度	0.30	9.40	5.11	0.55	2.81	-0.11	-1.10
林内降雨动能	0.0038	187.00	55.40	1.13	62.85	0.86	-0.59
降雨总动能	1.0100	869.00	281.64	0.93	263.26	0.75	-0.38
林冠缓冲动能	1.0012	698.00	226.23	0.94	212.70	0.81	-0.31

对林地径流量和产沙量进行回归分析(图3),关系式为: $M=0.3421S+0.0219$, $R^2=0.9057$ 。式中: M 为泥沙重量(g); S 为径流量(mm)。可知二者呈明显的正相关关系,产沙量随着径流量的增大逐渐增加,最大径流量为4.36 mm,对应的产沙量为1.587 t/km^2 ;而当径流量为4.036 mm时,对应的产沙量最大,为1.768 t/km^2 。当产沙量 $M \geq 0.064$ mm时,地表径流开始携带泥沙,说明当地表径流较小时,径流对林地表层的土壤冲刷作用也较小。

表1 林地径流量和的产沙量变异特征

指标	平均值	标准差	变异系数	最小值	最大值	峰度	偏度
径流量	2.08	1.67	0.80	0.1120	4.360	-1.78	0.08
产沙量	0.69	0.60	0.87	0.0048	1.768	-1.22	0.58

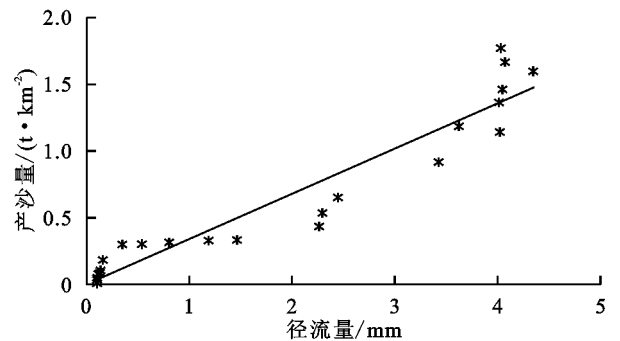


图3 林地径流量和产沙量的关系特征

2.3 径流量产沙量影响因子的冗余分析与排序

2.3.1 影响因子的统计特征 通过对不同影响因子进行描述性统计分析发现,除了林内降雨动能外,其他影响因子的变异系数较小,各指标的变化比较稳定(表2)。林内降雨动能的变异系数达1.13,可能是受降雨事件实际情况及林冠层分配作用的影响,导致收集的林内降雨动能数据变异程度较大。其他影响因子的变异系数为0.16~0.94,属中等变异($0.1 < CV < 1$),说明受降雨历时、降雨量及降雨动能等因素的影响,各环境因素对径流量和产沙量的影响效果存在显著差异。

2.3.2 径流量产沙量与其环境因子的冗余分析 对径流量产沙量及其各环境因子间进行双侧相关性分析(表3),结果表明,影响因子的相关性存在较大差异,但RDA排序图能够综合多种环境影响因子,通过排序分析把排序轴和已知的环境影响因子联系起来,能够直观地展示出产沙量和径流量与各环境因子之间的内在联系。图4中粗箭头连线代表径流量产沙量,细箭头连线代表主要环境影响因子,细线箭头连线与粗线箭头连线之间的夹角的余弦值代表径流量或产沙量与某主要环境因子之间的相关性,

夹角越小,相关性越高,反之越低;细箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,用细线箭头与排序轴夹角的余弦值表示二者之间的相关程度;细线箭头所在线段的长度表示环境因子与径流量产沙量相关性的大小,线段越长,说明相关性越大,反之则越小。对产流产沙量的影响因子进行去趋势分析,得到的梯度长度均 <3 ,故选择RDA分析;为避免冗余变量的影响,使用前向选择法进行分析,同时应用Monte Carlo检验来检测各环境因子和产流产沙量间的相关性。

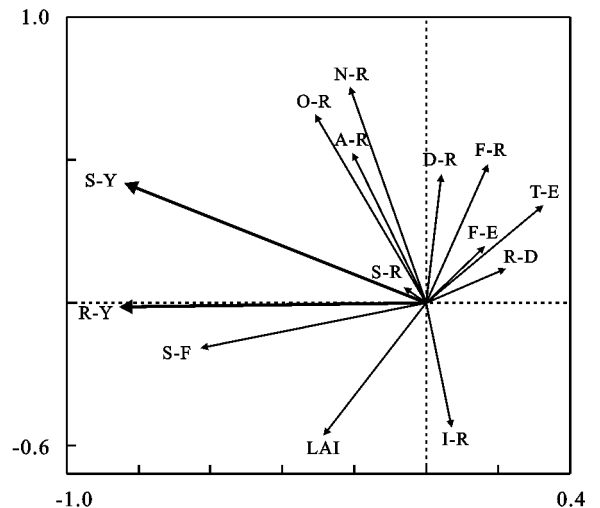
表3 产流产沙量环境影响因子相关性分析

影响因子	径流量	产沙量	降雨历时	林外降雨量	林内降雨量	树干径流量	叶面积指数	平均雨强	雨滴个数	雨滴直径	雨滴速度	林内降雨动能	降雨总动能	林冠缓冲动能
径流量	1													
产沙量	0.850**	1												
降雨历时	-0.042	0.152	1											
林外降雨量	0.254	0.534*	0.355	1										
林内降雨量	-0.154	0.058	0.427	0.131	1									
树干茎流量	0.537*	0.459*	-0.500*	0.118	-0.465*	1								
叶面积指数	0.250	0.046	-0.592**	-0.216	-0.484*	0.705**	1							
平均雨强	0.168	0.392	0.289	0.589**	0.351	-0.074	-0.678**	1						
雨滴个数	0.169	0.492*	0.512*	0.840**	0.340	-0.130	-0.365	0.551**	1					
雨滴直径	-0.189	-0.135	-0.363	0.057	0.191	0.063	0.085	0.053	0.008	1				
雨滴速度	0.051	0.073	-0.402	-0.213	-0.280	0.107	0.005	0.044	-0.165	0.258	1			
林内降雨动能	-0.141	-0.054	0.847**	0.107	0.238	-0.586**	-0.533*	0.086	0.174	-0.308	-0.206	1		
降雨总动能	-0.283	-0.131	0.194	0.074	0.097	0.008	-0.350	0.387	-0.030	0.079	0.011	0.008	1	
林冠缓冲动能	-0.054	-0.243	-0.836**	-0.409	-0.209	0.381	0.602**	-0.368	-0.423	0.251	0.338	-0.672**	-0.380	1

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

从影响因子的RDA排序结果(图4)来看,第1排序轴能够解释所有信息的99.1%,第2排序轴能够解释0.9%,累计解释信息量达100%。因此,前两个排序轴能够很好地解释环境影响因子与径流量和产沙量的关系,并且主要是由第1排序轴决定。林冠缓冲动能、叶面积指数和树干茎流量分别在排序图的第4、第3象限,说明这3个环境因子对径流量产沙量产生负反馈作用,随着三者的增大径流量和产沙量随之减小。其余的环境因子(降雨历时、林外降雨量、林内降雨量、平均雨强、雨滴个数、雨滴直径、雨滴速度、林内降雨动能、降雨总动能)都分布在第1和第2象限,对径流量产沙量产生正反馈作用。

2.3.3 主导影响因子RDA的排序及解释 采用CANOCO的Forward分析,对12个环境因子进行主导因子筛选,结果表明,降雨总动能、林外降雨量、平均雨强、林冠缓冲动能、降雨历时对径流量产沙量的影响效果显著。因此,提取这5个主导因子做RDA排序图(图5),进一步分析主导因子对径流量产沙量的贡献率,并比较12个环境因子的信息解释量与5个主导因子信息解释量的差异。



注:S-Y为产沙量;R-Y为径流量;D-R为降雨历时;O-R为林外降雨量;F-R为林内降雨量;S-F为树干茎流量;LAI为叶面积指数;A-R为平均雨强;N-R为雨滴个数;R-D为雨滴直径;S-R为雨滴速度;F-E为林内降雨动能;T-E为降雨总动能;I-R为林冠缓冲动能。

图4 环境因子对径流量产沙量影响的冗余分析

经过图5的排序分析可直观看出提取出来的5个主导环境因子中,林冠缓冲动能与排序轴的横轴呈

显著负相关性($P < 0.05$),平均雨强、降雨历时、林外降雨量、降雨总动能与横轴呈显著正相关性($P > 0.05$),从左到右各环境因子呈增加的趋势,即林外降雨量越大,平均雨强越大、降雨历时越长、降雨总动能越大,径流量和产沙量越大;反之,随着林冠缓冲动能的增大,径流量和产沙量则减少。从排序图的夹角来看,林冠缓冲动能与产沙量的夹角最大,相关性系数相比其余几个主导环境因子较低;降雨总动能与径流量的夹角最大,相关性系数最低;林外降雨量与产沙量和径流量的夹角都是最小的,相关性系数最高,并且从与箭头的连线长度来看,此环境因子的线段长度是最长的,与二者的相关性最大。

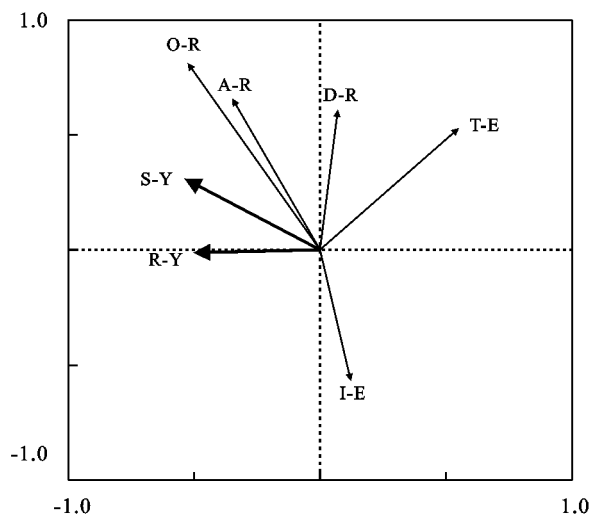


图5 主导环境影响因子的RDA排序

此外,从表4的RDA分析结果显示,第1排序轴能够解释所有信息的98.6%,第2排序轴能够解释1.4%,累计解释信息量达100%。主要的影响效果主要由第1排序轴解释,5个主导环境因子对径流量和产沙量的正负反馈作用影响大小排序为:平均雨强>林冠缓冲动能>降雨历时>林外降雨量>降雨总动能。此外,排序结果为从典范特征值分析结果显示,仅选择这5个主环境影响变量可解释环境影响因子与径流量产沙关系的73.2%的信息量,比12个变量所解释的信息量少16.8%,说明排序轴与主导环境因子之间的线性结合程度能最大化地反映环境影响因子与径流量产沙的关系。

表4 主导环境影响因子的RDA分析结果

环境因子	第1排序轴	第2排序轴
林外降雨量	-0.3662	0.4584
林冠缓冲动能	0.4620	-0.3224
降雨历时	0.4347	0.3451
平均雨强	-0.5775	0.3709
降雨总动能	0.2784	0.2995
径流量产沙量-环境相关性累积变化率/%	98.6	100
典范特征值	0.832	
总特征值	1.000	

3 讨论

通过对研究区降雨量和径流量、产沙量的相关性分析看出,径流量和产沙量均随降雨量的增大而增大,从采样点的时间分析原因可知,采样期间研究区受到“天鸽”台风的影响,遇到历时长、雨量大的强降雨天气,暴雨天气下雨滴动能较大,对地表土壤的冲刷作用较强,最终导致径流小区集水槽内堆积大量地表泥沙。此结果与四川黄壤区^[10,15]和黔西北地区^[16]的研究结论一致。从产沙量和径流量之间的相关性来看,产沙量与径流量存在正相关性函数关系,根据实际情况分析,可能原因是遇上短历时、雨量大、强度高的降雨事件,降雨期间产生的地表径流多而急,降雨对地表土壤层的冲刷作用时间比较集中,从而产生的地表径流中携带大量的泥沙,这与艾宁等^[17]利用逐步回归分析的方法得到径流量对产沙量起到决定性作用的结论相似。径流量 > 0.064 mm时,形成的地表径流开始携带泥沙,可能是土壤的分离速率随地表径流的增大而增大造成的^[18]。此外,径流量、产沙量随林外降雨量和林内降雨量的增大而增大,这与雨强有较大的关系^[19]。

对产流产沙产生影响的环境因子进行冗余分析,发现林冠缓冲动能、叶面积指数和树干茎流量与产流产沙量存在负相关性,其中叶面积指数是林分郁闭度的重要决定因素之一。叶面积指数越大林分郁闭度越大,反之则越小;叶面积指数与产流产沙量存在负相关性,这与张海涛等^[20]研究的皆伐径流小区在随着林木生长及森林环境的形成后林分郁闭度与产流、产沙量的关系出现差异的结论相似。降雨历时、林外降雨量、林内降雨量、平均雨强、雨滴个数、雨滴直径、雨滴速度、林内降雨动能、降雨总动能对产流产沙量产生正相关影响,此结论与诸多学者的研究结果相似^[10,15,17,19,20]。

本研究筛选出来的主导环境影响因子包含平均降雨强度和降雨历时,这与林锦阔等^[21]得到的产流量和产沙量不受二者的影响的结论存在差异,可能原因是林锦阔等^[21]主要以荞面和花生等低矮的农作物为研究对象,与高大茂密的乔木层存在较大差异。这也论证了郭敏^[22]得出的不同土地利用类型对径流量产沙效果存在显著差异,林地削减洪峰、减少径流的水分调节作用更强,减水减沙效果更加明显。但与张兴奇等^[16]的研究结果相似。此外,还有诸多学者从径流小区坡度、坡向^[16,19]、林地枯落物生物量、不同植被类型^[10]、土壤密度^[17]、林地改造^[20]等方面对坡面径流量产沙量进行探讨,而本研究除了研究降雨事件及叶面积指数等因素对林地产沙量和径流量的影响外,还加入了目前少有学者关注的雨滴特性(雨滴

大小、雨滴速度、雨滴动能和林冠截留动能)影响因素对产沙量和径流量的影响,使得分析结果更全面、更具有科学性,为林区的水土保持技术提供参考依据。

4 结论

(1)产沙量与林外降雨量和林内穿透雨量存在正相关性,当径流量 >0.064 mm 时,地表径流开始携带泥沙;林冠层对降雨动能的缓冲作用在降雨强度小的情况下较明显。

(2)通过对径流量产沙量产生影响的环境因子进行冗余分析,得出林冠缓冲动能、叶面积指数和树干茎流量与径流量、产沙量存在负相关性,降雨历时、林外降雨量、林内降雨量、平均雨强、雨滴个数、雨滴直径、雨滴速度、林内降雨动能、降雨总动能对径流量、产沙量产生正相关影响。

(3)对 12 个环境因子进行主导因子筛选,其中降雨总动能、林外降雨量、平均雨强、林冠缓冲动能、降雨历时对径流量、产沙量的影响效果显著。影响大小排序为:平均雨强 $>$ 林冠缓冲动能 $>$ 降雨历时 $>$ 林外降雨量 $>$ 降雨总动能。从典范特征值分析结果显示,这 5 个主环境影响变量可解释环境影响因子与径流量产沙关系的 73.2%的信息量,比 12 个变量所解释的信息量少 16.8%。

参考文献:

[1] 张颖,牛健植,谢宝元,等.森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理[J].生态学报,2008,28(10):5084-5094.

[2] Carroll C, Merton L, Burger P, et al. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(2): 313-328.

[3] 陈三雄,沈义.黄浦江源头区主要植被类型土壤入渗特征及模拟分析[J].水土保持研究,2016,23(6):59-63.

[4] Garciastringana P, Alonsoblázquez N, Marques M J, et al. Direct and indirect effects of Mediterranean vegetation on runoff and soil loss[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(2): 174-185.

[5] 李锐,上官周平,刘宝元,等.近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):1-6.

[6] Gumiere S J, Bissonnais Y L, Raclot D, et al. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: A review[J]. Earth Sur-

face Processes and Landforms, 2011, 36(1): 3-19.

- [7] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 29(9): 1161-1169.
- [8] Raya A M, Zuazo V H D, Martínez J R F. Soil erosion and runoff response to plant-cover strips on semiarid slopes (SE Spain) [J]. Land Degradation and Development, 2010, 17(1): 1-11.
- [9] 徐海燕,赵文武,朱恒峰,等.黄土丘陵沟壑区坡耕地与草地不同配置方式的侵蚀产沙特征[J].中国水土保持科学,2009,7(3):35-41.
- [10] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].应用生态学报,2005,16(9): 1613-1617.
- [11] 方瑜.区域森林生态系统水文调节功能空间特征评价[D].北京:中国科学院研究生院,2012.
- [12] 杞金华,章永江,张一平,等.哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J].生态学报,2012,32(6):1692-1702.
- [13] 李振新,欧阳志云,郑华,等.卧龙地区针叶林及亚高山灌丛对降雨的雨滴谱及能量的影响[J].水土保持学报,2004,18(4):125-129.
- [14] 王学民.偏度和峰度概念的认识误区[J].统计与决策,2008(12):145-146.
- [15] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4): 7-12.
- [16] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):18-22.
- [17] 艾宁,魏天兴,朱清科,等.基于通径分析的陕北黄土坡面径流产沙影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(6):77-84.
- [18] 郭继成,张科利,董建志,等.西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J].土壤学报,2013,50(6):1102-1108.
- [19] 张赫斯,张丽萍,朱晓梅,等.红壤坡地降雨产流产沙动态过程模拟试验研究[J].生态环境学报,2010,19(5): 1210-1214.
- [20] 张海涛,宫渊波,付万权,等.次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):51-55.
- [21] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,30(5):7-12.
- [22] 郭敏.基于 SWAT 模型的土地利用变化对流域产流产沙的影响研究[D].北京:中国科学院大学,2016.